CRITERIOS DE DISEÑO A SER CONSIDERADOS EN LAS INSTALACIONES ELECTRICAS SEPARACION ENTRE CIRCUITOS DE PUESTA A TIERRA

Marcos Andrade, Senior *Member, IEEE*

Resumen—En las plantas industriales existen instalaciones eléctricas diversas, con diferentes tensiones y finalidades. Las instalaciones de puesta a tierra que forman parte de cada una de ellas revisten un rol fundamental en la seguridad de las personas y el equipamiento. También son fundamentales para asegurar la compatibilidad electromagnética. Se discute la interconexión entre estas instalaciones de puesta a tierra desde el punto de vista de la seguridad. La decisión para interconectar puestas a tierra industriales de baja y alta tensión debe ser objeto de un cuidadoso estudio. No es suficiente establecer distancias generales, mínimas de separación entre las mismas, sin considerar su extensión relativa y el tipo de terreno. Se agregan gráficos que ayudan al proyectista a seleccionar la opción a definir

***Palabras Claves*— Puesta a tierra, resistencia mutua, seguridad, interconexión**

I. INTRODUCCION

EN instalaciones industriales o comerciales extensas la alimentación de potencia se realiza en media o alta tensión, por lo que coexistirán instalaciones de distintas tensiones, incluyendo baja tensión. Las instalaciones de puesta a tierra de cada tensión y su posible interconexión constituyen uno de los puntos fundamentales en la seguridad del personal que opera las mismas. Reglas generales para la interconexión se establecen en todos los reglamentos de instalaciones (en particular en el código de seguridad eléctrica sustentado por IEEE en USA, NESC).

Como regla general se prohíbe la interconexión y se admite la misma a cambio de que se cumplan determinadas condiciones. En este caso, las condiciones establecidas en los reglamentos, o bien no son suficientes o bien implican la realización de estudios detallados. Se describen las formas usuales de alimentación de energía eléctrica de una planta industrial, en particular la distribución de media tensión interior. Este es el punto de partida para discutir la interconexión entre las distintas instalaciones de puesta a tierra. Las elevadas corrientes de falta de los alimentadores primarios transfieren potenciales elevados a otros electrodos de puesta a tierra situados en las proximidades. Las tensiones transferidas, en estos casos, aun para electrodos de tierra muy extensos, alcanzan valores que pueden no ser tolerados. Dos electrodos de tierra se considerarán separados si la resistencia mutua es lo suficientemente baja para controlar los potenciales transferidos durante la falta. Esta condición se cumple si existe una distancia de separación suficiente entre instalaciones, la que dependerá de la extensión relativa de los electrodos, de la resistividad del terreno, pero sobre todo de la homogeneidad del mismo. Dado que la separación entre electrodos extensos es difícil de obtener, se discute, utilizando valores de resistencia mutua calculados, en instalaciones tipo, cuando se puede interconectar y cuando no, y se establecen lineamientos generales de interconexión. Para los cálculos se utiliza un software que ha sido usado por veinte años y contrastado con cálculos realizados por el EPRI.

A. Red de media tensión propia

La planta industrial es alimentada por una o más líneas de transmisión de alta o media tensión, las que confluyen en una subestación. Esta subestación se encuentra suficientemente alejada, para transferir potenciales peligrosos en las instalaciones de puesta a tierra de la planta.

En esta subestación se transforma a media tensión, la que se distribuye en el interior de la planta, alimentando algunos centros de maniobra y varios transformadores distribuidos, los que alimentan la red de baja tensión. El esquema anterior puede ser utilizado también, aunque la alimentación sea en media tensión. Este caso aparece, aunque con poca frecuencia en instalaciones que poseyendo ya una red de media tensión interior, han aumentado su potencia, alimentándose de una red de mayor tensión. También es muy frecuente en el caso de industrias con generación propia, debido a que la tensión de generación es diferente de la tensión de la red de alimentación.

Marcos Andrade. IEEE Senior Member. Colonia 924/50-CP 1100 Montevideo-Uruguay. mandrade@ieee.org. Tel 598 2 9032777 Fax 598 2 9015110. Universidad de Montevideo. Alfex SA, Artecing SA,

En estos casos por lo general por razones de mejor rendimiento, la industria es alimentada a la tensión de generación.

Dada la poca extensión de la red de media tensión así definida, por razones de confiabilidad se opta por sistemas de neutro con bajas corrientes de falta a tierra.

En general se encuentran situaciones propicias para interconectar las puestas a tierra de media y baja tensión, manteniéndose separas las tierras de alta tensión.

B. Utilización de la red de media tensión externa

La red de media tensión de la empresa distribuidora, se utiliza también como red de distribución interior de la planta, ésta es la situación más frecuente. La solución para inercnectar depende fundamentalmente del sistema de neutro utilizado en la red de distribución, ya que es posible que las corrientes de falta a tierra sean elevadas. La interconexión entre instalaciones de tierra media y baja tensión debe discutirse extensamente.

II. RIESGOS DE CHOQUE ELECTRICO

Alrededor del 80% de las faltas en redes de media y alta tensión corresponden a cortocircuitos entre una de las fases y tierra. Durante la falta se produce la circulación de corriente entre las instalaciones de puesta a tierra y el terreno circundante, lo que provoca diferencias de potencial entre distintos puntos del mismo.

Si una persona circula dentro, o en las proximidades de la instalación de puesta a tierra aparece una tensión entre sus pies, al encontrarse, éstos, en contacto con distintos puntos de la superficie del terreno (tensión de paso).

Los objetos conductores situados en el terreno, distorsionan la distribución de corriente durante la falta y adquieren tensiones respecto a su superficie.

Estos elementos conductores pueden ser otras puestas a tierra intenciones, como la puesta a tierra de la red de baja tensión, la puesta a tierra del conductor neutro (en el caso de ser diferente de la anterior). También hay que considerar puestas a tierra no intencionales, cañerías de agua gas aire, aceite vapor y estructuras metálicas o de hormigón armado como cimientos o bases de equipos, En toda oportunidad en que se produce una falta que fuerza la circulación de corriente hacia el terreno, se producen tensiones entre todo material conductor enterrado parcialmente y la superficie del terreno sobre el que se encuentran. Estos objetos conductores pueden estar al alcance de la mano de una persona, la que estará sometida a una tensión entre manos y pies. También puede ocurrir una tensión entre manos si se encuentra tocado dos objetos metálicos distintos.

Se trata de saber cuando esta tensión entre un elemento conductor y tierra, entre distintos elementos conductores o entre distintos puntos del terreno puede traer como consecuencia riesgos de electrocución.

A. Tensiones tolerables

La circulación de corriente por la instalación de puesta a tierra, provoca que el potencial de la malla suba al valor RgIg. Donde Rg es la resistencia de puesta a tierra de la malla e Ig es la corriente dispersada por la malla directamente a tierra.

Tensión de paso es la que aparece entre los pies de la persona (separados un metro).

Tensión de toque es la que aparece entre manos y pies de una persona

La tensión que aparece sobre objetos metálicos no conectados a tierra, pueden denominarse también tensiones de toque, aunque en este caso puede hablarse de tensiones de toque por acoplamiento mutuo, o de transferencia por resistencia mutua.

Una situación de toque, que se de fuera del perímetro de la malla se denomina tensión de transferencia. Las tensiones a las que puede ser sometida una persona en el interior de una instalación, se comparan con las máximas tensiones que pueden ser soportadas por la persona, a los efectos de que el diseño sea seguro. Estas últimas se denominan tensiones tolerables.

Las tensiones de toque y paso tolerables por una persona están indicadas en la norma IEEE80-2000 [1] a través de las expresiones 27 a 33. Las que se pueden resumir en las dos expresiones siguientes:

$$E_{step} = (R_B + 6C_S\rho_S)I_B \qquad (1)$$

$$E_{touch} = (R_B + 1.5C_S\rho_S)I_B \qquad (2)$$

La corriente total que circula por el cuerpo de la persona I_B, depende de su peso y del tiempo de duración de la falta. R_B representa la resistencia interna de la persona y es considerada normalmente 1000 ohmios. Las expresiones dependientes del coeficiente C_S y de ρ_S, significan la resistencia vista hacia el terreno de los pies de la persona. El valor ρ_S representa la resistividad superficial del terreno, donde se ha colocado un material de recubrimiento superficial que aumenta el valor de la resistencia vista. C_S representa el efecto de las dos capas de resistividad distinta, la capa superficial de recubrimiento y el resto del terreno. Las tensiones tolerables dependen, de la resistividad superficial de la zona en que se encuentre la persona ubicada cuando ocurre la falta. Los distintos tipos de pisos serán determinantes, pisos de hormigón húmedo, o de hormigón reforzado con estructuras metálicas, entrepisos metálicos no conectados a tierra, serán aquellos en los cuales las tensiones tolerables son menores, llegando en algunos casos al valor de la tensión entre contactos metálicos (ρ_S =0). En las zonas en exteriores, no pavimentadas, la tensión tolerable dependerá del tipo de terreno. También existirán zonas internas con resistividad superficial elevada.

Dado que la elevación de potencial se trasmite a todos los puntos de la planta, es menester considerar los valores más bajos, para una persona de de 50 kg de peso y un tiempo máximo de duración de la falta de un segundo, las tensiones de paso y toque resultarán de 116 voltios.

III. MEDIDAS PREVIAS AL DISEÑO

Cuando las instalaciones a construir se ejecutan en un predio vacío, las medidas a realizar en el terreno natural y la consideración de eventuales movimientos de tierra son suficientes. Las dificultades se encuentran cuando se trata de construir en zonas con instalaciones existentes, antiguas, con sucesivas modificaciones a lo largo del tiempo. En estos casos deben tenerse consideraciones especiales para determinar la resistividad del terreno y fundamentalmente para determinar la influencia de electrodos existentes en el diseño de las futuras instalaciones.

A. Medida de resistividad

Las medidas de resistividad en zonas donde existen instalaciones se dificultan debido a la distorsión de la distribución de potenciales en el terreno producidos por elementos conductores y no conductores enterrados [9].

Como alternativas para la medida se pueden considerar tres métodos principales.

Se pueden realizar medidas de resistividad sobre una zona de terreno natural, similar al de las instalaciones, pero sobre un área no edificada.

En zonas con construcciones es recomendable utilizar el método de enterrado de jabalina ya que los valores medidos, de resistencia son poco influidos por la cercanía de conductores enterrados próximos. Aunque deben seleccionarse cuidadosamente los puntos de instalación de los electrodos auxiliares.

El método de Wenner puede utilizarse sin error, aunque existan largos conductores enterrados, siempre que se mida sobre una línea perpendicular. Aún si se mide en sentido paralelo al conductor solo se tienen errores si la separación del conductor es del orden de la separación entre electrodos [9].

B. Electrodos existentes

Deben identificarse completamente todos los electrodos cercanos al las instalaciones de puesta a tierra y medir continuidad entre ellos. Para esto se inyecta corriente continua entre ellos y se mide la resistencia resultante. [5] Son muy útiles los cateos que se realizan normalmente para las construcciones civiles, aunque normalmente es necesario realizar cateos adicionales en la proximidad de las instalaciones a realizar. Es bastante común que al excavar el terreno para realizar una nueva instalación se encuentre que existen construcciones anteriores, sobre las que se han realizado construcciones nuevas. Estas construcciones pueden consistir en viejas estructuras de hormigón armado

IV. POTENCIALES PELIGROSOS EN CERCANIA DE UNA SUBESTACION EXTERIOR

Se considera primero la influencia de la subestación de alta o media tensión situada en el mismo predio, pero en el exterior de las instalaciones industriales. Esto significa que habrá una distancia suficiente para considerar desacoplados los sistemas de la subestación con la instalación industrial propiamente dicha.

El esquema se plantea en la figura 1 y se tratará de evaluar probables zonas peligrosas en torno a la subestación y la separación necesaria entre ésta y el resto de las instalaciones de puesta a tierra.

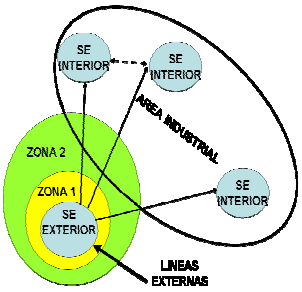

Fig. 1 Zonas próximas a SE

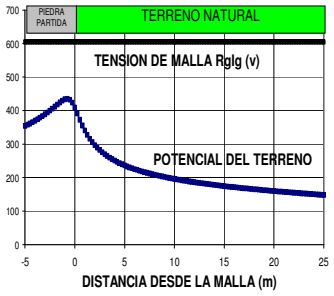

Fig. 2 Potencial en borde malla

A. Riesgo eléctrico en proximidad de una subestación

En la fig. 2 se muestra un perfil de potenciales sobre el borde de una malla de puesta a tierra, zona 1 de la figura 1. En el diseño de la malla las tensiones máximas calculadas se comparan con la tensión de toque y paso soportables por una persona dentro del recinto de la subestación. Para el diseño se considera su superficie mejorada con el agregado de una capa de piedra partida. En esta edición de la norma y sus ediciones anteriores, no se menciona que sucede con las tensiones de paso fuera del recinto de la subestación. En el contorno de la subestación, es la zona donde se producen los mayores gradientes de potencial y en consecuencia las tensiones de paso mayores y coincide con la zona donde no se instalada piedra partida y por lo tanto es dudoso que se cumpla la condición de seguridad.

La norma indica para subestaciones con cerco perimetral conectado a la malla, que debe extenderse la capa de piedra un metro hacia el exterior de la misma. Como la malla, por recomendación de la misma norma también se extiende a un metro fuera de la malla, la capa de piedra partida queda instalada justamente hasta el último conductor de la malla.

De todas formas el perfil de potencial presenta un cambio abrupto en las proximidades del último conductor de la malla y si bien se extiende el potencial creado por la misma a grandes distancias desde el borde de la misma, el gradiente de potencial solamente puede ser importante a unos pocos metros. La fig. 3 indica cual es la disminución de la tensión de paso en función de la distancia al borde de la malla para un ejemplo particular. Se ha tenido en cuenta la configuración del terreno. Para esto se ha supuesto el terreno en el que se instala la subestación constituido por dos capas horizontales, de distinta resistividad (ρ_1 y ρ_2), situada la segunda capa a una profundidad h.

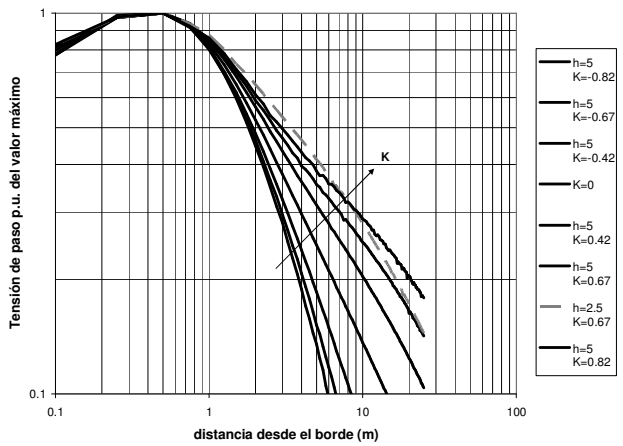

Fig. 3 Tensiones de paso externas a la malla

Si la capa superior es más resistiva que la capa inferior, la corriente tiende a drenar hacia las capas más profundas, disminuyendo las corrientes superficiales y haciendo que su influencia sobre la superficie del terreno sea menor. Sin embargo este hecho se asocia a que las tensiones de paso son mayores. También influye el diseño de la malla, en estos casos se utilizan electrodos profundos para conectarse con los terrenos más conductores y el efecto de corrientes drenadas directamente hacia el suelo debajo de la malla aumenta.

Si la capa superior es menos resistiva que la inferior, las corrientes tienden a distribuirse mayormente por las zonas del terreno cercanas a la superficie. Esto hace que los potenciales se extiendan a mayores distancias desde el borde de la malla, aunque los perfiles de potenciales, tienen también menores gradientes y por lo tanto generan tensiones de paso menores.

Para estimar las tensiones de paso fuera de la malla se ha desarrollado el siguiente procedimiento.

La tensión de paso máxima se calcula, utilizando la expresión (92) de la norma IEEE-80-2000.

Para determinar las tensiones de paso a una distancia "x" desde el borde de la malla se multiplica la tensión de paso obtenida de la norma por el valor obtenido de la fig. 3, dependiente del valor del coeficiente de reflexión k, y se compara con la tensión de toque soportable, obtenida para $\rho_s=\rho_m$.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \qquad (3)$$

El orden al que alcanzan las tensiones de paso a distancias hasta cinco metros pueden alcanzar del 3 al 9 por ciento del valor de RI, en general a distancias mayores a 10 m desde el borde, las tensiones alcanzadas son menores que uno por ciento de RgIg.

Cabe destacar que aun estos porcentajes pequeños de la tensión a la que se eleva la malla pueden representar valores mayores que las tensiones soportables. La malla debería ser proyectada para controlar la tensión de paso en su exterior.

B. Tensiones transferidas por acoplamiento mutuo

Este caso corresponde al de una subestación de corriente de falta elevada, instalada de forma externa a la zona abarcada como zona industrial.

Se calcula la malla utilizando un valor resistividad superficial 3000 ohm-m, por lo que las tensiones de toque tolerables oscilarán en los 500/√t V para una persona de 50 kg de peso y un tiempo de t de duración de la falta. Las tensiones de toque máximas que se pueden encontrar en el interior de la instalación serán menores.

En una zona de cobertura industrial se estimó más arriba que la tensión tolerable mínima es de 116√t V.

Se debe cumplir que

$$d \geq \frac{E_{toudh50(SE)} R_g}{E_{touch50(industria)} E_t} \frac{2\sqrt{A}}{\pi\sqrt{\pi}} \qquad (4)$$

En la fig. 4 se indica la separación estimada para que esta condición se cumpla para distintos diámetros equivalentes de la malla y distintos valores de resistividad media.

.

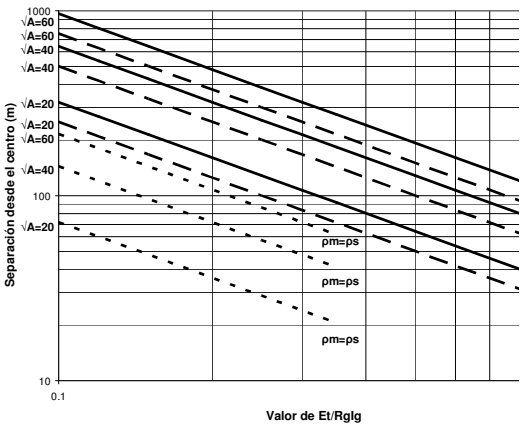

Fig. 4 Distancias de acoplamiento seguro

C. Terrenos no homogéneos

Los resultados indicados en la figura 4 son representativos para un suelo homogéneo, y la resistencia mutua está estimada utilizando el modelo de la semiesfera, el que es completamente válido para distancias del orden de dos veces el diámetro equivalente de la malla.

Esta situación varía de forma importante si el terreno no es homogéneo. La figura 5 muestra en porcentaje de la resistencia de malla y en ohm, el valor obtenido para la resistencia mutua entre dos mallados de 60x60 m y 9 mallas cada uno, enterrado a 0.8 m de profundidad. Las mallas están ubicadas según su diagonal y con una separación de d=150 m entre centros.

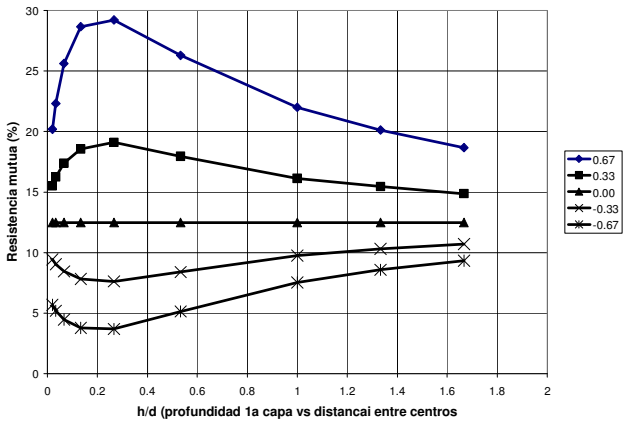

Fig. 5 Acoplamiento entre mallas en función de k y h

Se han realizado cálculos para un modelo de terreno de dos mallas horizontales de distintas resistividades y para distintas profundidades de la segunda capa de terreno (h).

La resistencia mutua es bastante mayor cuando mayor es la resistividad de la capa superior respecto de la inferior (k positivo), llegando a valores superiores al 100% respecto a un suelo homogéneo, para una coeficiente k de 0.67 y una relación de 0.3 entre la profundidad de la segunda capa y la distancia entre centros de las mallas.

Como forma de corrección para suelos no homogéneos, podrían utilizarse los valores de la fig. 4, afectados del cociente entre los valores indicados en la fig. 5, para los valores de k y h/d que correspondan, divididos por el valor correspondiente a suelo homogéneo.

V. SUBESTACIONES INTERIORES

Con el término subestaciones interiores, nos referimos fundamentalmente a aquellas instalaciones instaladas dentro de un edificio de la zona industrial o en un local independiente, pero abarcadas totalmente dentro del área industrial.

A. Interconexión

La primera situación a explorar consiste en estudiar la posibilidad de interconectar ambas instalaciones.

Las masas metálicas de la instalación, máquinas, estructuras estarán interconectadas entre sí y a la instalación de tierra de la subestación. Por lo tanto, durante la ocurrencia de una falta, todos estos elementos metálicos adquirirán el mismo potencial respecto a una tierra lejana. Una persona, que esté en contacto con cualquiera de las masas metálicas de la instalación estará sometida a tensiones de toque, las que deberán ser soportadas en toda la extensión de la instalación. Esto implica en consecuencia que debe cumplirse que

$$E_{touch50} \geq Z_g I_g \qquad (5)$$

Se ha utilizado Z_g en lugar de R_g para resaltar el hecho de que para instalaciones de puesta a tierra menores que 0.5 ohmios se trata ya de un valor de impedancia de puesta a tierra debido a la influencia de la impedancia de los conductores de la instalación y de los elementos dispersores, cables de guardia, pantallas de cables. La tensión $E_{touch50}$ se deberá considerar entonces de 116 V para t=1 s.

Esta es una condición muy difícil de lograr para redes con corrientes de cortocircuito a tierra elevadas, ya que solamente es posible encontrar valores pequeños de la resistencia de puesta a tierra para mallas extensas, y en esos casos la influencia de la longitud de los conductores hace que la resistencia sea en realidad una impedancia de puesta a tierra [5], y no sea posible obtener valores menores que 0.1 o 0.2 ohm. Si el límite el valor de la impedancia de una zona considerada extensa puede situarse de forma tentativa en un valor del orden de 0.25 ohmios, deberemos limitar la corriente inyectada directamente al terreno a 500 ampere Si la resistencia de puesta a tierra es del orden un ohm, entonces la corriente de falta debe limitarse al orden de los 100 A.

En la misma situación si se puede diseñar una malla de tierra físicamente separada para la subestación (de no existir interconexiones físicas de hecho), la resistencia mutua será menor que la menor de las dos resistencias, en este caso la de baja tensión. Por lo tanto también es posible dejar sin interconectar y la tensión transferida a la red de baja tensión será menor que el valor que adquiriría si interconectamos.

Dentro de los requerimientos establecidos por el NESC [4] para realizar interconexiones se obliga a instalar una jabalina en el punto de conexión de los descargadores de sobretensión. Si bien este es un aspecto importante, es un aspecto básico para todos los diseños de instalaciones de puesta a tierra de subestaciones.

Ejemplo #1-Una planta industrial cuenta con generación propia e interconexión con la red de la empresa distribuidora. Existen tres tensiones diferentes dentro de la planta, la tensión de distribución 31,5 kV, la tensión de generación y distribución interna 13.8 kV y hay varios puntos de transformación a baja tensión, 400 V.

La corriente de falta a tierra de las redes de 31,5 kV y de 13.8 kV es del orden de 350 A.

La corriente de falta a tierra es razonablemente baja como para lograr un valor de resistencia de puesta a tierra bajo para que las tensiones de toque sean tolerables en toda la planta, esto significa un valor menor que 116/350 o sea alrededor de 0.3 ohm.

Existe sin embargo una condición operativa particular que provocaría una corriente de falta mayor que 1000 A. Si hubiera que diseñar para esta corriente la resistencia de la instalación de tierra debería ser menor que 0.12 ohmios, valor que no es fácil de obtener, Sin embargo, la faltas a tierra en la red de 13.8 kV quedan circunscriptas al predio de la instalación, la corriente de falta circula casi exclusivamente por los conductores de la malla.

Existen las cercanías de la planta viviendas para el persona, que son alimentadas desde la misma red que la planta. Se utiliza el neutro separado para la puesta a tierra de las viviendas, mediante la construcción de una red tipo TT, se utilizan puestas a tierra locales para las viviendas.

Existe una cañería de agua que sale del predio, pero dada la unificación de puestas a tierra no necesita de consideraciones

particulares, como tampoco son necesarias para la subestación que alimenta la planta de bombeo en el extremo opuesto.

B. Resistencia mutua interior

Consideremos que se debe instalar una subestación en un edificio industrial. En estas condiciones, el local estará constituido por una estructura de mampostería o por una estructura constituida con columnas y coberturas metálicas.

La cimentación de la estructura puede considerarse como un conjunto de electrodos dispersores instalado en cada una de las columnas. También existirán vigas horizontales de variada profundidad y dimensiones.

En los locales construidos en mampostería difícilmente se habrán tomado medidas para que exista una conexión metálica real entre estos diferentes electrodos. Los ensayos de inyección de continuidad realizados en estructuras ya construidas, y entre ellas y cañerías existentes muestran que existe una resistencia elevada entre las mismas.

Estos electrodos deben ser modelados como electrodos independientes a los efectos del cálculo de resistencia mutua. Una excepción a este método de cálculo lo constituyen instalaciones con columnas de acero conectadas a la instalación de tierra.

Ejemplo #2- En una planta industrial se tiene una estructura de mampostería en la parte frontal y un conjunto de galpones hacia el fondo con columnas de hormigón armado y techo de chapa. Ambas estructuras han sido unidas por un techo liviano. Medidas iniciales muestran que no existe continuidad metálica entre las estructuras del local frontal, zona, donde se instalará la subestación. Se relevan los elementos conductores en la proximidad de la subestación.

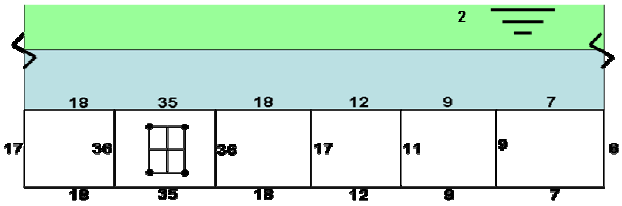

Fig. 6 Porcentaje de resistencia mutua

La figura 6 muestra las tensiones transferidas a electrodos horizontales y a la tierra de baja tensión.

La tensión transferida a las vigas cercanas del edificio pueden llegar a valores de 40% de la tensión de malla, para las demás vigas las tensiones transferidas son inferiores al 20% y mucho menores a medida que nos alejamos de la malla de la subestación.

Se separan los objetos conductores enterrados directamente en la zona de la malla de la subestación, por ejemplo, al anclaje de un tensor de la chimenea de la caldera se agregan aisladores con un explosor.

La instalación de puesta a tierra de baja tensión se realiza a una distancia de 50m de ésta.

VI. MEDIDAS PARA DISMINUIR LAS TENSIONES TRANSFERIDAS

Es frecuente que la decisión ente interconectar o separar las puestas a tierra sea dificultoso.

Dos soluciones son las más frecuentemente utilizadas, la primera consiste en disminuir todo lo posible la corriente de falta (6.1), lo cual mejora siempre la solución. La segunda solución (6.2) puede utilizarse cuando se ha podido realizar un mallado separado, para una subestación de maniobra y el problema lo presentan los transformadores dentro de la planta. Es posible realizar una instalación sin un mallado debajo de la zona donde se instala el transformador.

A. Transferencia del punto de falta

Se denomina transferencia del punto de falta al hecho de que la corriente se traslada parcialmente hacia la subestación o subestaciones anteriores debido al acoplamiento mutuo entre conductores de fase y neutro en las líneas o cables de alimentación.

En cables la distribución de corrientes puede llegar a valores de hasta 95% en casos especiales, pero usualmente puede situarse en valores del 60 al 70%. En el caso de líneas aéreas estos valores oscilan entre 15 y 30%.

Esta situación aplica a la mayoría de los casos pues la alimentación interna hacia las subestaciones en la planta se efectúa en cable.

Debido al acoplamiento mutuo entre los conductores de fase y la pantalla de los cables, si ambos extremos del cable están conectados a tierra, al momento de circular por los conductores la corriente de falta se inducirá en la pantalla una corriente de retorno. La corriente de retorno depende del cociente entre la impedancia mutua entre los conductores de fase y pantallas de los cables, y de la impedancia de secuencia cero de la pantalla.

En el caso de líneas aéreas con cable de guardia, también se inducen corrientes en el conductor de guardia, pero la relación de impedancias es bastante menor que la del cable de potencia.

Otros aspectos que influyen son la resistencia de puesta a tierra de la alimentación que se va a conectar, la resistencia de puesta atierra de la subestación desde la que se alimenta y la conexión de esta última al resto del sistema. Se puede mejorar el acoplamiento de varias formas, Para cables subterráneos se pueden tender uno o dos conductores de tierra, con el mismo recorrido del cable de potencia. Para líneas aéreas se pueden utilizar mejores conductores para el cable de guardia, conductores de aluminio en lugar de acero.

Ejemplo #3-SE trata de la alimentación de la planta desde una línea aérea, se instala un puesto de medida exterior y luego se continúa la instalación hacia la planta utilizando cables subterráneos.

Parte de la corriente de falta se transferirá al punto de interconexión cable línea debida a las impedancias mutuas entre el conductor de fase y la pantalla del cable.

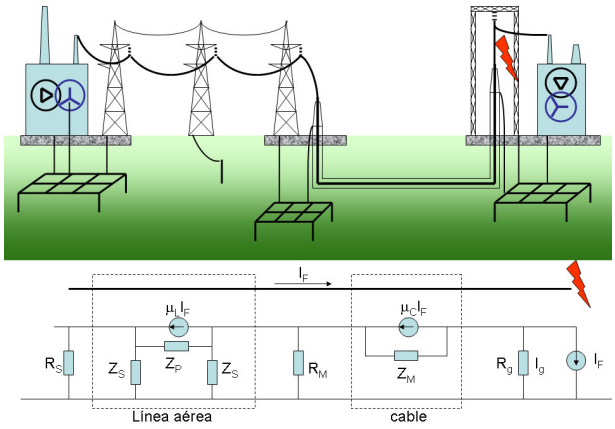

Fig. 7 Esquema y circuito simplificado de transferencia de falta

Los coeficientes μ_C y μ_L para la línea y el cable se obtienen mediante la aplicación de las ecuaciones de Carson. Para los cálculos realizados se han tomado los valores siguientes: μ_C =0.7, μ_L =0.3. Rs ha sido tomado en 6.4 ohm.

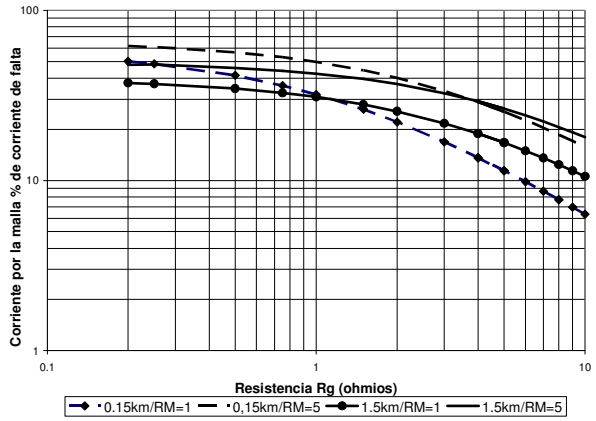

Fig. 8 Reducción de la corriente de falta en la subestación interior

Como puede apreciarse fig. 8, la corriente drenada a tierra por la malla, en el ejemplo, puede variar desde 6 a 65% de la corriente de falta.

- Si bien se trata solamente de un caso ejemplo, pueden obtenerse varias conclusiones; La corriente drenada por la malla disminuye notoriamente con su resistencia de puesta a tierra. Debe estudiarse bien la interconexión, fundamentalmente teniendo en cuenta que, la corriente drenada aumentará apreciablemente.
- Cuando mayor sea la longitud del cable, mejor será el efecto de transferencia de la corriente de falta hacia el punto de alimentación. Aunque este efecto es menos notorio que el anterior.
- Se logra una mejor transferencia disminuyendo la resistencia de puesta a tierra de la subestación anterior. A estos efectos mejora la dispersión de corrientes por los cables de guardia de otras líneas, aunque no sean alimentadoras.
- Si la subestación de transición está en el predio, deberán tenerse en cuenta todas las consideraciones para lograr un buen diseño de instalación de puesta a tierra, ya que puede ocurrir que la instalación abarque un área pequeña y por consiguiente tenga un diseño comprometido.

B. Instalación de transformador sin puesta a tierra local

La forma constructiva consiste en evitar la instalación de puesta a tierra local, se instala el transformador y los descargadores la tierra de media tensión a través del conductor de la pantalla del cable de potencia.

También es posible tender en parte del recorrido del cable un conductor de tierra, exclusivamente en las zonas alejadas, dependiendo de la resistencia mutua con los electrodos de baja tensión. Luego este conductor se continúa aislado de tierra.

Si bien las tensiones que se obtengan durante una falta a tierra adquirirán los valores de tensiones transferidas, éstas tensiones son perfectamente aisladas por una alfombra, con aislamiento para baja tensión. De esta forma, el descargador de sobretensión queda instalado entre los bornes de media tensión del transformador y su cuba, obteniéndose una adecuada protección.

Puede suceder que la pantalla del cable, debido a la incidencia de una onda de tensión de impulso adquiera un potencial respecto de tierra elevado. Esto se resuelve instalando un explosor, o un descargador de sobretensión para baja tensión entre la tierra de media tensión y la tierra de baja tensión. En estas condiciones ambas tierras están separadas, excepto para un impulso de sobretensión atmosférica en cuyo caso la tensión es drenada a tierra a través de la puesta a tierra de baja tensión. En general se utiliza una puesta a tierra localizada para descargas de impulso (jabalina o pata de araña), unida a los restantes electrodos de tierra de baja tensión. La instalación de un explosor en el circuito de tierra ha sido incorporado al NESC en forma reciente.

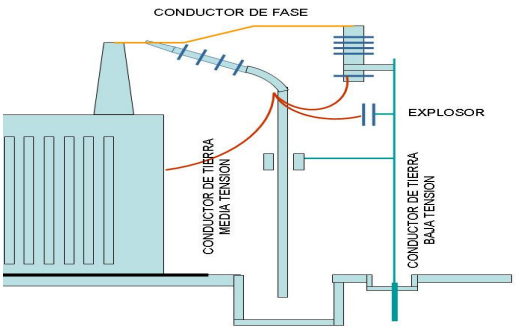

Fig. 8 esquema de instalación sin malla

VII. PRACTICAS ACONSEJADAS

- El proyecto de puesta a tierra de toda la instalación debe ser ejecutado por un único proyectista, no es aconsejable adoptar una práctica, que es bastante habitual lamentablemente, y que consiste en contratar el proyecto de media tensión por un lado y en el de baja tensión trabajar de forma separada y aun trabajar sin proyecto en

la red de baja tensión.

- En la memoria de operación y mantenimiento de la subestación debe dejarse totalmente claro la forma en que ha sido diseñado el sistema de puesta a tierra y las precauciones que deben considerarse en caso de reforma o ampliación.
- Es incorrecto pensar que siempre es posible obtener dos instalaciones de puesta a tierra separadas.
- El proyectista debe considerar especialmente cuando se trata de un terreno no homogéneo, la influencia sobre la separación de circuitos se modifica de forma importante si se tiene una capa inferior de terreno de mayor o menor resistividad que la capa superior.
- No es recomendable considerar una distancia fija entre dos instalaciones como suficiente para considerarlas separadas. Una distancia de separación debe estar relacionada con las dimensiones de cada una de las instalaciones.
- No es correcto considerar solamente el valor de resistencia de puesta a tierra como único elemento que define los criterios a utilizar para el diseño, o como único elemento a medir.
- Es obligatorio medir en sitio, luego de construidos las instalaciones, por lo menos las tensiones que definen el proyecto, es decir las tensiones de paso, transferencia y eventualmente resistencia.
- Es recomendable utilizar jabalinas largas en el diseño cuando el terreno lo permita, el acoplamiento es menor que entre electrodos horizontales y las jabalinas, se encuentran en contacto con un terreno de contenido de agua más estable.

VIII. CONCLUSIONES

Es frecuente encontrar instalaciones de puesta a tierra de media y baja tensión, separadas, las que en la práctica, debido a su elevada resistencia mutua son capaces de transferir potenciales peligros en las instalaciones de baja tensión o en objetos conductores. No siempre es sencillo, ni siquiera posible muchas veces optar entre interconectar o no dos instalaciones. Se han descrito los casos más comunes de instalaciones industriales encontrados, para cada uno de ellos se ha indicado un procedimiento básico a los efectos de lograr un diseño seguro.

Finalmente luego de construida la instalación es preciso realizar medidas de potenciales transferidos y de continuidad de circuitos.

REFERENCIAS

[1] Standard IEEE 80 2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”ar
[2] Standard IEEE 142 – “2007 2Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”
[3] Standard IEEE 1100-2005 “Powering and Grounding Electronic Equipment”
[4] NESC C2-2007
[5] 81.2-1991 IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristicsof large, extended or interconnected grounding systems
[6] Andrade Marcos - CIER SDEE Viña del mar Chile 1987. Cálculo de potenciales en mallas de tierra
[7] Andrade Marcos, Slomovitz Daniel I SIDEE Belho Horizonte Brazil 1990 Grounding Gris Design for Substations and Distribtion Lines.
[8] Andrade Marcos 6ª CEDE Buenos Aires, Argentina “Puesta a tierra de sistemas de electrificación rural
[9] Andrade Marcos, Slomovitz Daniel Discussion on : “Study of influence of buried metallic structures on soil resistivity measurements. Transactions On PWRD vol 13 Nº2 april 1998

Marcos Andrade (M’89–SM’95). Nació en Montevideo, Uruguay el 4/08/49. Ingeniero Electricista en 1975, por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Trabajó en Generación, Transmisión y Distribución de energía Eléctrica. Ha sido proyectista y director de obra de un gran número de instalaciones industriales de media y alta tensión. Ha diseñado varios tipos de relés de protección. Es docente de la Universidad de Montevideo. Es autor o coautor de más de treinta trabajos publicados sobre protección de sistemas eléctricos y puestas a tierra. Es director de ALFEX SA y de ARTEC Ingeniería MERCOSUR